mgr inż. Mieczysław Haładewicz*

Recenzent: dr hab. inż. Witold Pytel

Tensometryczny przetwornik typu „inkluzja sztywna" do pomiaru zmian naprężeń w górotworze

Słowa kluczowe: pomiar naprężeń, mechanika górotworu
Key words: stress measurements, rock mechanics

Streszczenie:
Przedstawiono wyniki prac badawczych KGHM CUPRUM sp. z o.o. – CBR, w ramach których opracowano, wykonano i przebadano tensometryczny przetwornik do ciągłych pomiarów zmian naprężeń in situ w górotworze skalnym. Przetwornik ten należy do grupy przetworników ze „sztywną inkluzją", które charakteryzują się tym, że zbudowane są z materiału o module sprężystości E_s wielokrotnie większym niż skała. W artykule opisano budowę przetwornika, gdzie pokazano sposób zamontowania tensometrów i elektroniki wewnątrz stalowego cylindra pomiarowego oraz wygląd rzeczywisty wykonanych modeli. Przedstawiono główne dane techniczne oraz otrzymane charakterystyki prądu wyjściowego przetwornika w funkcji naprężenia w próbce skalnej i aluminiowej. Artykuł podaje proponowane sposoby przesyłu sygnału z przetwornika do systemów dyspozytorskich, istniejących w kopalniach LGOM.

1. Wstęp

Aktualnie, w górnictwie podziemnym, do oceny stanu naprężeń w górotworze poprzez pomiar odkształcenia otworów badawczych wykorzystuje się dwa rodzaje czujników: „miękkie" (z ang. *soft inclusion*) i „sztywne" (z ang. *rigid inclusion*).

Największa grupa czujników to czujniki „miękkie", określane jako deformometry, których podatność E_s elementu ściskanego (czujnika siły) wynosi:

$$E_{s\ czujnika} < 3 \times E_{s\ skały} \qquad (1)$$

*KGHM CUPRUM sp. z o.o. CBR, ul. gen. Wł. Sikorskiego 2-8, 53-659 Wrocław

Drugą grupą czujników do pomiaru stanu naprężeniowego górotworu są tzw. czujniki „sztywne”, określane jako „stressmeter - naprężeniomierz”, dla których:

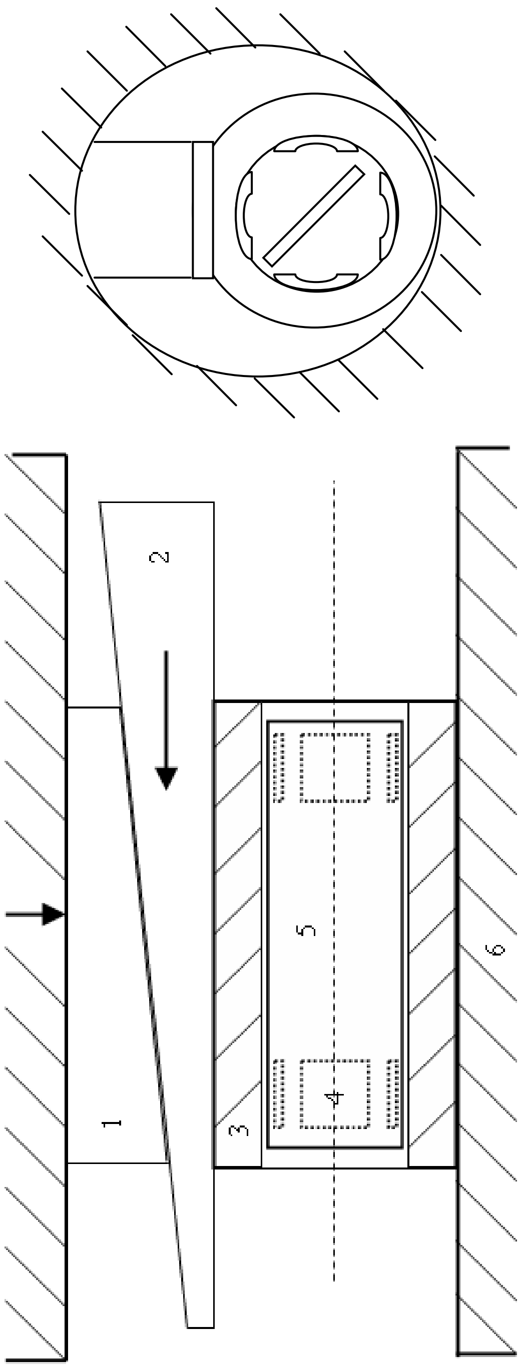
$$E_{s\ czujnika} > 3 \times E_{s\ skały} \qquad (2)$$

Czujniki sztywne, „stressmeter – naprężeniomierz”, umożliwiają długotrwały pomiar zmian naprężeń in situ w obszarze otaczającym otwór z czujnikiem, gdyż będąc sztywno rozparte w otworze pomiarowym, poddawane są takim samym przyrostom naprężeń jak skała. Naprężenia te zmieniają się w trakcie eksploatacji złoża i mogą osiągać wartości przekraczające wytrzymałość skały na ściskanie, co prowadzi do zniszczenia struktury skały. Ponieważ czujniki sztywne zbudowane są z materiału o module sprężystości E_s i wytrzymałości R_c wielokrotnie większych niż skała, to naprężenia graniczne dla skał będą mieścić się jeszcze w zakresie odkształceń sprężystych elementu pomiarowego czujnika, a więc będzie on wiernie oddawać zmiany naprężeń przed i po zniszczeniu skały.

W ramach pracy badawczej [1], podjętej w celu opracowania systemu zdalnych pomiarów zmian naprężeń w górotworze przy pomocy sztywnych przetworników zmian naprężeń, opracowano konstrukcję czujnika typu „sztywna inkluzja”, umożliwiającego długotrwałe, zdalne i ciągłe pomiary zmian naprężeń w masywie skalnym w obszarach wydobywczych kopalń rud miedzi.

2. Opis budowy tensometrycznego przetwornika zmian naprężeń TPZN-1

Ideę działania sztywnego przetwornika zmian naprężeń obrazuje rys. 1, w którym do rozpierania stalowego cylindra pomiarowego (3) wewnątrz otworu badawczego (6) wykorzystano klin stalowy (2) oraz stalową płytkę dociskową (1). Do pomiaru zmian obciążenia cylindra pomiarowego wywołanych naciskiem skały na płytkę dociskową służą umieszczone wewnątrz cylindra pomiarowego tensometry (4) oraz układ elektroniczny (5) przetwornika napięcia wyjściowego mostka tensometrycznego na prąd standardowy 4-20 mA. Cylinder pomiarowy wraz z naklejonymi wewnątrz tensometrami i przetwornikiem $\Delta U/I_{stand.}$ stanowi czujnik siły, a wyposażenie go w płytkę dociskową o znanej powierzchni czyni go przetwornikiem zmian naprężeń. Widok modelu przetwornika TPZN-1 w wersji z płytką dociskową 11,4 cm^2 pokazano na fot. 1.



Rys. 1. Sposób działania przetwornika zmian naprężeń



Fot. 1. Przetwornik TPZN-1 z płytką dociskową 11,4 cm^2

3. Dane techniczne przetwornika TPZN-1

a.	Zakres mierzonych naprężeń ściskających	– zależny od E_s
b.	Błąd podstawowy czujnika siły w TPZN-1	– ≤ 0,4%
c.	Sygnał wyjściowy	– prądowy 4-20 mA, dwuprzewodowy
d.	Napięcie zasilania	– 9V do 24V DC
e.	Średnica otworu badawczego	– 42 ÷ 44 mm
f.	Zakres temperatury pracy	– 0°C do 40°C
g.	Wilgotność	– do 100%
h.	Odporność obudowy	– IP67
i.	Głębokość osadzania w otworze badawczym	– do 15 m
j.	Zgodność z Dyrektywami CE	– nie dotyczy (U<50VDC)

4. Badania przetwornika TPZN-1 zamontowanego w modelach sześciennych o boku 150 mm

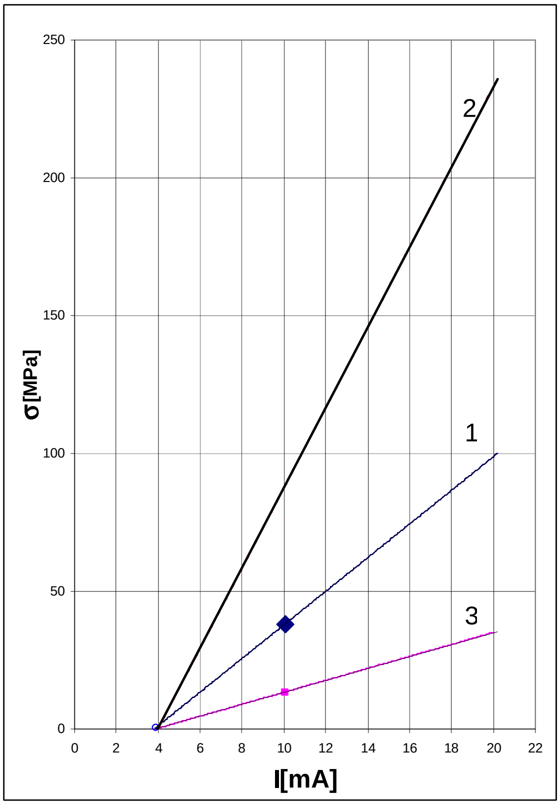
Przetwornik TPZN-1 poddano badaniom, celem których było wyznaczenie charakterystyk metrologicznych w modelach doświadczalnych wykonanych z materiałów o różnych wartościach modułów sprężystości. Badania te przeprowadzono na dwóch modelach sześciennych o boku 150 mm wykonanych z następujących materiałów:

– model 1: aluminium o E_s = 73 GPa; R_c = 180 MPa
– model 2: dolomit marglisty o E_s = 23 GPa; R_c = 68 MPa.

Modele miały wywiercony centralnie poziomy otwór o średnicy ø = 42 mm, w którym mocowano przetwornik TPZN-1 do ścian otworu płytką dociskową o powierzchni 11,4 cm^2.

Modele te wraz z umieszczonym wewnątrz przetwornikiem badano w maszynie wytrzymałościowej D1500-S firmy W+B, poddając je obciążeniu ściskającemu. W trakcie badania określono charakterystyki prądu wyjściowego przetwornika w funkcji naprężenia ściskającego σ wytworzonego w modelu. Charakterystyki te oraz prostą przetwarzania prąd – naprężenie

dla samego przetwornika umieszczonego w maszynie wytrzymałościowej wykreślono na wspólnym wykresie (rys. 2).



Rys. 2. Naprężenie σ w funkcji prądu wyjściowego I dla przetwornika TPZN-1 w: dolomicie (1), w aluminium (2) oraz bezpośrednio w maszynie wytrzymałościowej (3)

Otrzymane z pomiarów równanie zmiany naprężenia Δσ w funkcji prądu wyjściowego przetwornika $\mathbf{I_{TPZN}}$, prądu odczytanego po rozparciu wstępnym przetwornika $\mathbf{I_0}$ i w zależności od modułu sprężystości E_s skały przedstawiono poniżej:

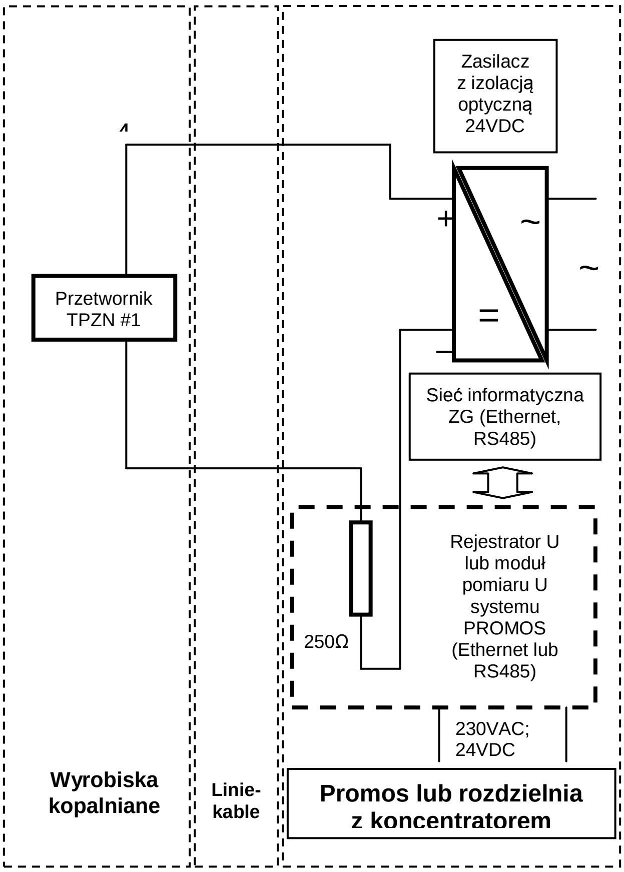
$$\Delta\sigma_{skała} = (0{,}077 \times E_s + 1{,}09) \times \{2{,}17 \times (I_{TPZN} - I_0) - 8.36\} \qquad (3)$$

5. Metody przesyłu sygnału pomiarowego z przetwornika TPZN-1 do komputerowych systemów dyspozytorskich Zakładów Górniczych

Przetwornik TPZN-1 został wyposażony w standardowy sygnał pomiarowy 4 mA – 20 mA, który można przesyłać do urządzenia rejestrującego przy pomocy dwuprzewodowej linii transmisyjne,j na odległość zależną od rezystancji kabla przesyłowego.

Do zasilania przetworników można stosować typowy zasilacz 230VAC/500VAC/24VDC, spełniający Dyrektywę Niskonapięciową (LV) CE

np. Cabur typ CSW120C. Do rejestracji można zastosować rejestrator cyfrowy z wejściami pomiarowymi dedykowanymi specjalnie do podłączenia przetworników pracujących w standardzie 4-20 mA lub zastosować specjalizowane moduły pomiarowe przetwarzające prądowy sygnał analogowy w cyfrowy w standardzie RS232, RS485 lub Ethernet. Przykładem takich urządzeń są moduły ADAM serii 6017 lub rejestratory serii 5000B firmy Eurotherm. Rejestratory te posiadają wyjście Ethernet, USB oraz gniazdo na karty pamięci SD, co umożliwia bezpośredni przesył danych na powierzchnię lub sczytywanie ich z karty pamięci. Innym sposobem przesyłu danych na powierzchnię jest sprzęgnięcie przetworników 4-20 mA z systemem PROMOS. Sposób przesyłu danych na powierzchnię obrazuje schemat na rys. 3.



Rys. 3. Schemat zasilania przetworników 4-20 mA na dole kopalni wraz z przesyłem danych linią światłowodową na powierzchnię

6. Wnioski

1. Zaprojektowany i wykonany przetwornik zmian naprężeń TPZN-1 charakteryzuje się liniową charakterystyką przetwarzania zmiany naprężenia w skali na prąd wyjściowy. Dokładność pomiaru zależeć będzie od do-

kładności oszacowania modułu sprężystości E_s skały otaczającej otwór badawczy z przetwornikiem. Np. dla próbki z dolomitu marglistego błąd pomiaru zmiany naprężenia wyniósł 1,4%.
2. Górny zakres pomiaru naprężeń ściskających przetwornik zależy również od modułu sprężystości (patrz wzór 3) i tak, dla skały o module sprężystości Es=13 GPa wynosi σ = 35 MPa, a dla skały o Es=23 GPa zakres σ = 90 MPa.
3. Przy pomiarze zmian naprężeń w skałach o Rc < 35 MPa (np. piaskowce ilaste), przetwornik powinien być osadzany w otworze badawczym wraz ze stalową stopką o krzywiźnie dopasowanej do średnicy otworu. Stopka ta zapobiegnie wgłębianiu się cylindra pomiarowego w ściankę otworu badawczego.
4. W przypadku instalacji przetwornika w skale o module sprężystości Es > 73 GPa, pomiary zmian naprężeń przetwornikiem TPZN-1 trzeba będzie poprzedzać jego wzorcowaniem w próbce skalnej pobranej z miejsca badania;
5. Opracowany przetwornik przystosowany jest do kątowego rozparcia w otworze pomiarowym co umożliwia montaż do trzech przetworników w jednym otworze badawczym pod różnymi kątami i oszacowanie kierunków zmian naprężeń w otoczeniu przetworników.
6. Przetwornik do pomiaru zmian naprężeń dopasowany jest do średnicy otworu badawczego ø = 43±1 mm. Możliwe jest wykonanie przetwornika dopasowanego do otworów badawczych o większych średnicach np.: 60 mm
7. Przesyłanie wyników pomiarów w czasie rzeczywistym do systemów dyspozytorskich kopalni, korzystając z istniejących na dole kopalń LGOM sieci teleinformatycznych (koncentrator ABB FOX5xx oraz PROMOS), da nową jakość w ocenie zachowania górotworu, gdyż pozwoli śledzić nie tylko zmiany bezwzględne przyrostu naprężeń, ale również obserwować prędkość przyrostu tych zmian oraz wychwycić moment zniszczenia struktury skały w otoczeniu przetwornika TPZN-1.
8. Opracowany przetwornik zmian naprężeń może znaleźć zastosowanie:
   - w kopalniach do pomiarów zmian naprężeń w stropach, ociosach i filarach,
   - do pomiaru zmian naprężeń wokół tuneli,
   - w opomiarowaniu zbiorników podziemnych,
   - w badaniu zachowania się budowli betonowych.

Literatura

[1] Haładewicz M.: Opracowanie systemu zdalnych pomiarów zmian naprężeń w górotworze przy pomocy sztywnych przetworników naprężeń – Prace własne KGHM CUPRUM sp. z o.o. – CBR, Wrocław 2009.

Rigid inclusion strain gauge transducer for stress change measurements in rock mass

The article presents the results of research works conducted in KGHM CUPRUM Ltd. R&D Centre, which include engineering and examination of the strain gauge transducer for continuous in situ measurements of stress changes in the rock. This is a "rigid inclusion" gauge, made of a material with an elastic modulus E_s much greater than the rock modulus. In the paper, a construction of the transducer is described, showing how the foil strain gauges and an electronic board are mounted inside a hollow steel cylinder as well as the view of produced models. It also presents general technical data of the transducer and characteristics of output current signal vs. stress changes in the rock and Al block samples. Proposed ways of transmitting transducer output signals to control rooms in the LGOM mines are included.